

ИМИТАЦИЯ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Ковшевский А. А., Нужин Е. Е., Шестаков А. П.

¹ *ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Екатеринбург, Россия (620002 Россия, г.Екатеринбург, ул. Мира, 19), контакт-центр: 8-800-100-50-44*

² *АО «НПО автоматики им. Академика Н.А. Семихатова», Екатеринбург, Россия (620075 Россия, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 149), контакт-центр: 8 (343) 355-95-25*

Аннотация: В статье рассмотрена исполнительная часть схемы имитатора объекта контроля для автоматизированных систем контроля температуры, приведена схема исполнительной части, так же рассмотрен расчет точности схемы. Устройство позволяет проводить отладку и проверку системы в лабораторных условиях и на данный момент применяется для проверки автоматизированной системы контроля температуры на АО «НПО автоматики».

Ключевые слова: АСУ, контроль температуры, имитация объекта контроля.

SIMULATION CONTROL FACILITY FOR TEMPERATURE CONTROL SYSTEMS

Anton A. K., Nuzhin E. E., Shestakov A. P.

¹ *FSAEI VPO "Ural Federal University named after the first Russian President Boris Yeltsin", Ekaterinburg, Russia (Russia 620002, Ekaterinburg, Mira street, 19), the contact center: 8-800-100-50-44*

² *AO "NPO Automatics. Academician NA Semikhatova ", Ekaterinburg, Russia (Russia 620075, Yekaterinburg, street Mamin-Siberian, 149), the contact center: 8 (343) 355-95-25*

Abstract: The article considers the executive part of the circuit simulator object control for automated temperature control systems, a diagram of the executive, also reviewed the accuracy of the calculation scheme. The device allows you to debug and test systems in the laboratory and is currently used to test the automated system to control the temperature of JSC "NPO Automation".

Keywords: automation, temperature control, simulation object control.

Непрерывный контроль температуры является важной задачей во многих отраслях промышленности и повседневной жизни. Обеспечение постоянства температуры - важный аспект технических процессов, таких как плавка металлов, поддержание комфортной для проживания человека температуры и другие. В статье рассматривается способ имитации объекта управления автоматизированных систем контроля температуры. На рисунке 1 приведена структурная схема системы контроля температуры.

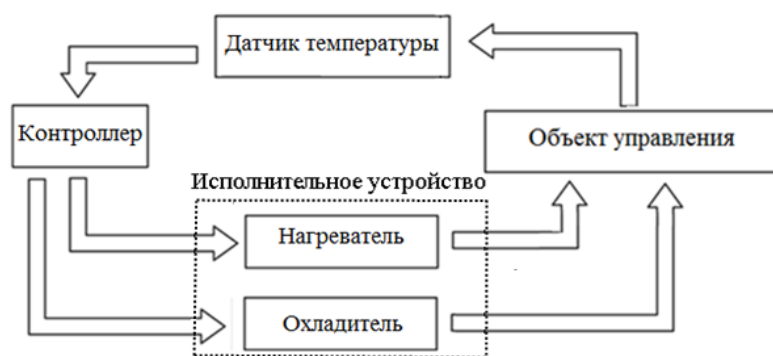


Рисунок 1. Структурная схема системы контроля температуры.

Рассмотрим основные части системы:

- датчик температуры – используется для измерения температуры объекта управления;
- объект управления – объект, температура которого контролируется системой управления;
- исполнительное устройство, включающее в себя нагреватель и охладитель;
- контроллер – реализует требуемый алгоритм управления, например поддержание требуемой температуры;

В зависимости от принимаемого с датчика сигнала температуры, контроллер управляет нагревателем (ТЭН) и охладителем.

В ходе разработки подобного рода систем возникает потребность в их отладке, которая содержит в себе проверку заложенных в контроллер законов управления, представленных в виде математических уравнений, и реакции системы в ограниченных условиях. Для осуществления подобного рода проверок в лабораторных условиях ставится задача имитации объекта контроля для системы управления.

Для решения поставленной задачи рассмотрим процесс формирования сигнала датчиком температуры и измерение сигнала контроллером. Терморезисторы бывают двух типов: с положительным температурным коэффициентом (PTC, Positive Temperature Coefficient), то есть увеличивающие свое сопротивление при повышении температуры, и с отрицательным (NTC, Negative Temperature Coefficient) – уменьшающие сопротивление с возрастанием температуры. В данной статье рассмотрим только PTC терморезистор. Приведенная ниже схема предназначена для имитации любого вида терморезисторов.

Основные параметры терморезисторов:

- максимальный допустимый измерительный ток;
- точность;
- коэффициент температурной чувствительности, характеризующий степень изменения сопротивления в зависимости от температуры;
- номинальное сопротивление – электрическое сопротивление, нормированное при определенной температуре;
- номинальная статическая характеристика (НСХ) – функциональная зависимость сопротивления от температуры терморезистора;

В качестве датчика температуры выбрано платиновое термосопротивление типа ТСП/1 с номинальной статической характеристикой 100П. Номинальное сопротивление при 0°C $R_0 = 100 \text{ Ом}$. Коэффициент температурного сопротивления $\alpha = 0,00391 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, что соответствует изменению сопротивления от 96,09 до 119,55 Ом в диапазоне температур от -10 до 50°C . На рисунке 2 приведена НСХ ТСП/1.

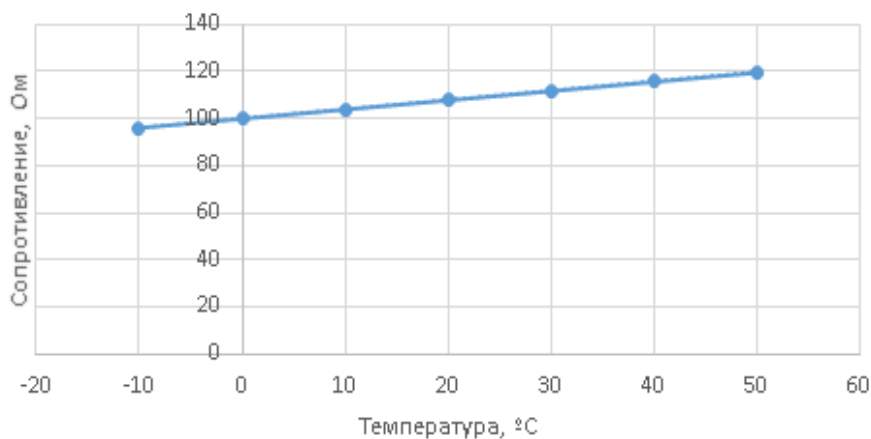


Рисунок 2. Номинальная статическая характеристика 100П.

Рассмотрим типичную схему включения термосопротивления для проведения измерений, представленную на рисунке 3.

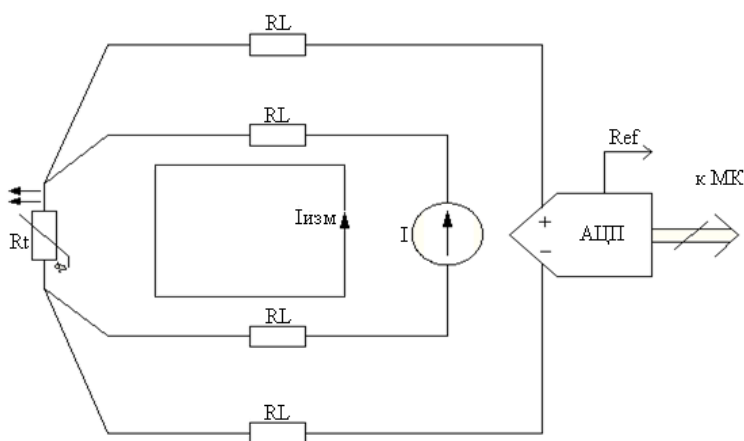


Рисунок 3. Типичная схема включения термосопротивления.

Где,

R_t – терморезистор.

АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

I – измеритель.

RL – паразитные сопротивления.

Ref – опорное напряжение АЦП.

МК – микроконтроллер.

$I_{изм}$ – измерительный ток.

Измерителем задаем постоянный ток $I_{изм}$. При повышении температуры возрастает номинал термосопротивления. На терморезисторе падает напряжение, которое измеряется АЦП микроконтроллера.

Для имитации объекта контроля предлагается структурная схема имитатора, представленная на рисунке 4.

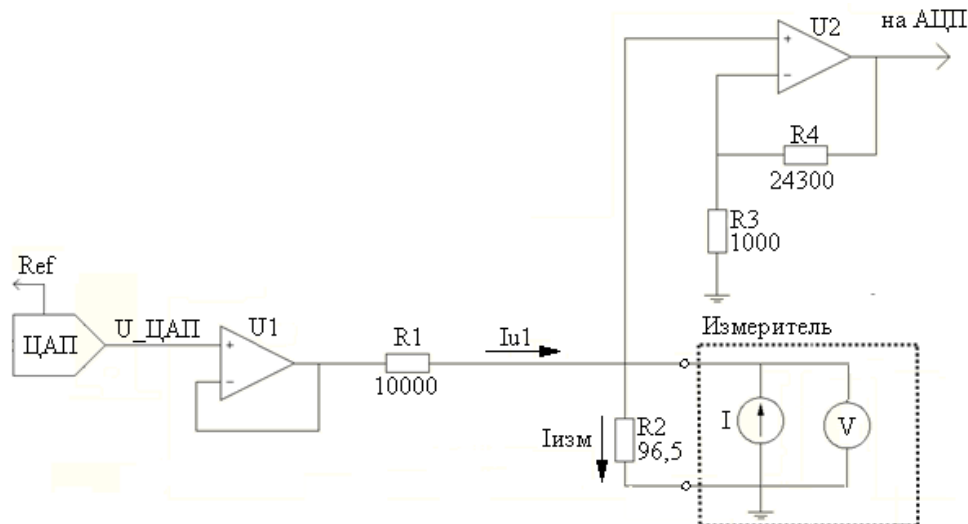


Рисунок 4. Схема имитатора объекта контроля.

Схема имитатора термосопротивления управляется напряжением, задаваемым с ЦАП ($U_{цап}$), управляемым микроконтроллером. Измеритель производит измерение термосопротивления подавая заданный постоянный ток $I_{изм}$ и проводя измерение падение напряжения на резисторе $R2$. По отношению напряжения на резисторе и заданного тока определяется сопротивление, измеритель производит перерасчёт сопротивления в температуру. Операционный усилитель $U1$ служит для согласования напряжения ЦАП с нагрузкой. Напряжение на резисторе $R2$ определяется током $I_{изм}$ и током операционного усилителя $U1$ (I_{u1}), включенного как генератор постоянного тока.

Методом контурных токов можно определить напряжение на резисторе $R2$ и, соответствующее ему выходное сопротивление имитатора $R_{им}$:

$$R_{им} = \frac{R2}{I_{изм} (R1+R2)} (I_{изм} R1 + U_{цап}) \quad (1)$$

Из полученной формулы (1) видно, что сопротивление имитатора ($R_{им}$) изменяется линейно при изменении $U_{цап}$ при постоянном измерительном токе измерителя. Рабочий диапазон термосопротивления ограничен сверху максимальным напряжением ЦАП и находится в диапазоне (2):

$$\frac{R1 R2}{R1+R2} \leq R_{им} \leq \frac{R1 R2}{R1+R2} + \frac{U_{цап\ MAX}}{I_{изм}} \frac{R2}{(R1+R2)} \quad (2)$$

Диапазон имитируемых значений термосопротивления находится в по формуле (3):

$$R_{им\ MAX} - R_{им\ MIN} = \frac{U_{цап\ MAX}}{I_{изм}} \frac{R2}{(R1+R2)} \quad (3)$$

Задав минимальное R_{MIN} и максимальное R_{MAX} значение имитируемого сопротивления $R1$ и $R2$ могут быть рассчитаны по формулам (4), (5):

$$R1 = \frac{U_{\text{ЦАП_MAX}}}{I1} \cdot \frac{R_{\text{MIN}}}{R_{\text{MAX}} - R_{\text{MIN}}} \quad (4)$$

$$R2 = \frac{U_{\text{ЦАП_MAX}}}{I1} \cdot \frac{R_{\text{MIN}}}{\frac{U_{\text{ЦАП_MAX}}}{I1} - (R_{\text{MAX}} - R_{\text{MIN}})} \quad (5)$$

Точность задания сопротивления $\Delta R_{\text{им}}$ зависит от разрядности ЦАП $r_{\text{ЦАП}}$ и выбора измерительного тока $I1$ (6):

$$\Delta R_{\text{им}} = \frac{1}{I1} \cdot \frac{R2}{(R1 + R2)} \cdot \frac{U_{\text{ЦАП_MAX}}}{2^{r_{\text{ЦАП}}}} \quad (6)$$

Погрешность задания сопротивления $\Delta R_{\text{им}}$ обусловленная отклонением $R1$ и $R2$ от номинальных значений можно определить взяв полный дифференциал $\Delta R_{\text{им}}$ по $R1$ и $R2$, и учитывая, что $\Delta R = R \cdot \delta R$, где δR относительное отклонение сопротивления от номинала. Тогда отклонение заданного сопротивления $\Delta R_{\text{им}}$ определяется формулой (7).

$$\Delta R_{\text{им}} = \frac{R1 \cdot R2 \cdot (I_{\text{изм}} \cdot R2 - U_{\text{ЦАП}})}{I_{\text{изм}} \cdot (R1 + R2)^2} \delta R1 + \frac{R1 \cdot R2 \cdot (I_{\text{изм}} \cdot R1 + U_{\text{ЦАП}})}{I_{\text{изм}} \cdot (R1 + R2)^2} \delta R2 \quad (7)$$

Используя формулы (1), (7) и НСХ терморезистора, отклонение заданной температуры определяется формулой (8).

$$\Delta t = \frac{R1 \cdot (R2 \cdot \delta R1 - R0 \cdot (\delta R1 - \delta R2))}{R0 \cdot (R1 + R2) \cdot \alpha} - \frac{R1 \cdot (\delta R1 - \delta R2)}{R1 + R2} t \quad (8)$$

Так как коэффициенты полинома от t (8) линейные функции от $\delta R1$, $\delta R2$, их экстремумы существуют только на границах допустимых значений $\delta R1$, $\delta R2$. В случае равенства допусков $R1$ и $R2$ (обозначим далее δR_{max}), границами допустимых значений будут плоскости: $\delta R1 = \delta R_{\text{MAX}}$, $\delta R1 = -\delta R_{\text{MAX}}$, $\delta R2 = \delta R_{\text{MAX}}$ и $\delta R2 = -\delta R_{\text{MAX}}$. Так как ограничивающие плоскости и коэффициенты полинома линейные функции от $\delta R1$ и $\delta R2$, то экстремум определяется на точках пересечения ограничивающих плоскостей: $\delta R1 = \delta R2 = \delta R_{\text{MAX}}$, $\delta R1 = -\delta R2 = \delta R_{\text{MAX}}$, $-\delta R1 = \delta R2 = \delta R_{\text{MAX}}$, $-\delta R1 = -\delta R2 = \delta R_{\text{MAX}}$. Максимальное возможное отклонение температуры от заданной в этом случае определяется формулой (9).

$$\Delta t = \pm \frac{R1}{R1 + R2} \cdot \delta R_{\text{max}} \cdot \text{MaxAbs} \left[\frac{R2}{R0 \cdot \alpha}, \frac{2R0 - R2}{R0 \cdot \alpha} + 2 \cdot t \right] \quad (9)$$

Операционный усилитель $U2$ используется для определения измерительного тока источника $I_{\text{изм}}$, с последующей обработкой АЦП микроконтроллера (на схеме не показан) для калибровки имитатора.

В расчете сопротивлений $R1$ и $R2$ за ток $I_{\text{изм}}$ системы контроля примем максимально допустимый – 1 мА. В имитаторе в качестве ЦАП выбран 16-и разрядный ЦАП с внешним источником опорного напряжения $U_{\text{ЦАП_MAX}}$ ($2,500 \pm 0,001$) В. Имитацию термосопротивления будем осуществлять в диапазоне от 95,6 до 119,5 Ом, что соответствует температурам от -11,3 до 49,9 °С соответственно. Вышеуказанному

диапазону сопротивлений имитатора соответствуют сопротивления: $R_1 = 10000 \text{ Ом}$ $R_2 = 96,5 \text{ Ом}$. Погрешность установки $R_{\text{ИМ}}$ обусловленная дискретностью установки напряжения на АЦП ($\Delta U_{\text{DAC}} = 38 \text{ мкВ}$) при выборе измерительного тока $I_{\text{изм}}$ в диапазоне $(0,1 - 1) \text{ мА}$ составляет $\pm(0,002 - 0,0002) \text{ Ом}$, что соответствует погрешности задания температуры $\pm(0,005 - 0,0005) \text{ }^\circ\text{C}$.

Сопротивления R_3 , R_4 операционного усилителя U_2 служат для задания усиления, оптимального для динамического диапазона АЦП. Диапазон входного напряжения АЦП ограничен сверху опорным напряжением микроконтроллера – $2,56 \text{ В}$. Что бы исключить большое энергопотребление ток делителя ограничен 1 мА . Что бы привести входное напряжение U_2 к динамическому диапазону АЦП зададим коэффициент усиления 25, тогда R_3 , R_4 примем равными 1 кОм и $24,3 \text{ кОм}$ соответственно.

Моделирование было проведено в среде OrCad для двух предельных режимов работы: $I_1 = 1 \text{ мА}$, $U_{\text{DAC}} - (0 - 2,5) \text{ В}$ и $I_1 = 0,1 \text{ мА}$, $U_{\text{DAC}} - (0 - 2,5) \text{ В}$. Напряжение ЦАП изменялось линейно в течении одной секунды. Измерялось отношение напряжения на входе I_1 к току модуля. Результаты моделирования представлены на рисунке 5 и рисунке 6.

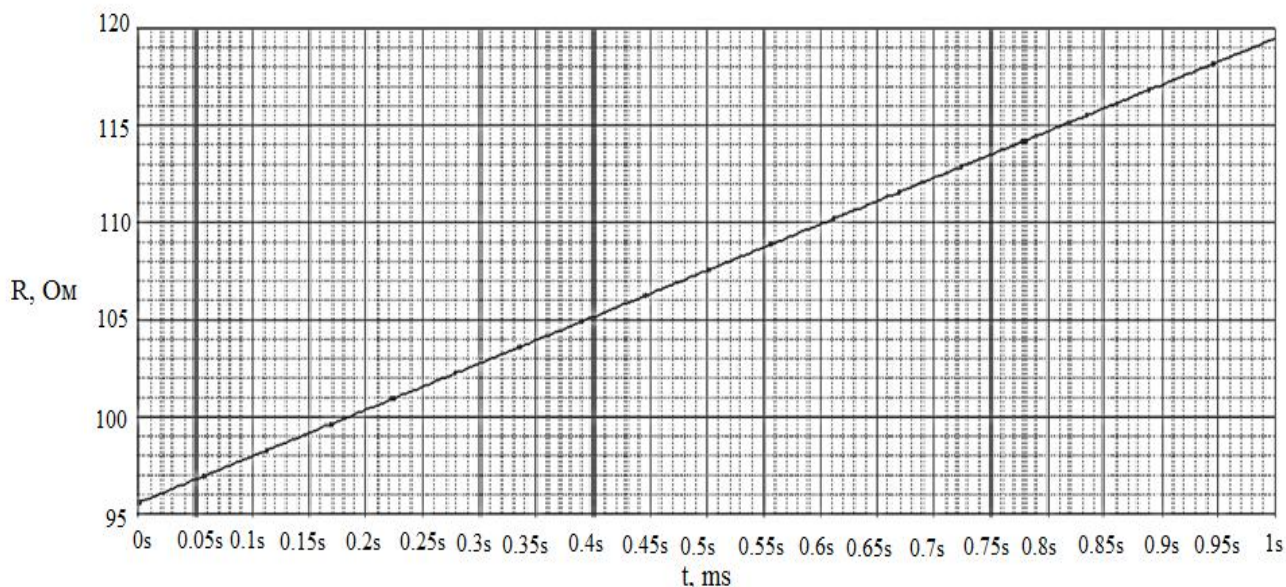


Рисунок 5. Имитируемое сопротивление при токе источника 1 мА .

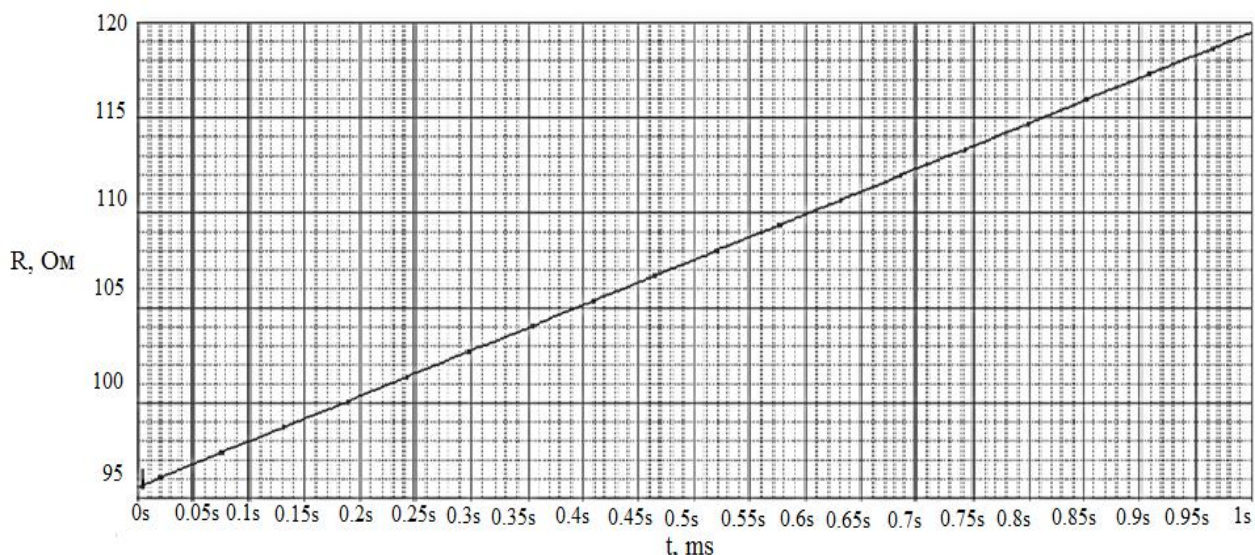


Рисунок 6. Имитируемое сопротивление при токе источника 0,1 мА.

Заключение

Была приведена схема исполнительной части имитатора объекта контроля, проведен расчет, оценена точность и проведено моделирование. Приведенное решение в случае использования 16-и разрядного ЦАП на входе и с учетом калибровки позволяет имитировать сопротивление датчика ТСП/1 8040 с НСХ 100П соответствующее температурам от -11,5 до 50,6 °С с точностью $\pm(0,005 - 0,0005)$ °С для токов источника (0,1 – 1) мА, используя сопротивления $R1$ и $R2$ с допуском $\pm 0,1$ % погрешность задания температуры снижается до $\pm(0,26 + 0,002 \cdot t)$, что ниже минимальной погрешности ТСП/1 8040 с НСХ 100П, которая составляет $\pm(0,30 + 0,005 \cdot t)$. Точность определения тока источника с допуском $R3$ и $R4$ в $\pm 1\%$ составляет ± 2 %. Результаты моделирования подтвердили проведенные расчеты. На данный момент схема применяется для отладки автоматизированных систем контроля температуры на стендах предприятия АО «НПО автоматики».

Список литературы

1. Быстров Ю.А., Мироненко И.Г. Электронные цепи и устройства: учебное пособие для электротехнических и энергетических ВУЗов: Москва, "Высшая школа", 1989. 288 с.
2. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники в 3-х томах. Том 1. Монография. Издание 4-е, переработанное и дополненное: Москва, издательство «Мир», редакция литературы по информатике и электронике, 1993.
3. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники в 3-х томах. Том 2. Монография. Издание 4-е, переработанное и дополненное: Москва, издательство «Мир», редакция литературы по информатике и электронике, 1993.
4. [Пасынков Владимир Васильевич](#). Полупроводниковые приборы [Текст] : учебник / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва : Высш. шк., 1987. - 479 с.

5. Бесекерский В. А., Попов Е. П. [Теория систем автоматического регулирования](#). Издание третье, исправленное. Москва, издательство «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1975.

References

1. Bistrov Y.A., Mironenko I.G. Electronic circuits and devices: a manual for the power and energy of universities: Moscow, "High School", 1989. 288 pp.
2. P. Horwitz, W. Hill The Art of Electronics in 3 volumes. Volume 1. Monograph. 4th edition, revised and enlarged: Moscow, publishing house "Mir", the editors of the literature on computer science and electronics, 1993.
3. P. Horwitz, W. Hill The Art of Electronics in 3 volumes. Volume 2. Monograph. 4th edition, revised and enlarged: Moscow, publishing house "Mir", the editors of the literature on computer science and electronics, 1993.
4. Pasynkov Vladimir. Semiconductors [Text]: the textbook / VV stepson LK Chirkin. - 4th ed., Rev. and add. - Moscow: Executive. HQ., 1987. - 479 p.
5. Besekersky VA, Popov EP Theory of automatic control systems. Third edition, revised. Moscow, publishing house "Science", Home Edition physical and mathematical literature, 1975.